

深厚软土层上“三合一”船进退法分层回填关键工艺

王军伟¹, 王远峰², 张壮壮², 李承柱^{2*}

(1. 中交广州航道局有限公司, 广东 广州 510290;

2. 中交广州水运工程设计研究院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 为了解决在菲律宾帕赛市-SM 集团吹填开发项目(I 期)中存在的回填作业区软土层含水率高、强度低, 平均厚度大, 直接吹填施工时, 地基极易出现挤淤及局部失稳, 影响后续施工质量的问题, 提出了深厚软土层上的“三合一”船进退法分层回填关键工艺, 工艺从进退法施工、方量测量作业、施工船组调度等方面进行优化。深厚软土层上的“三合一”船进退法分层回填关键工艺有着较高的施工效率, 有效解决了深厚软土层上的回填施工质量控制问题, 可为深水条件下的大型填海项目提供参考和借鉴。

关键词: 施工效率; 软土层; 分层回填

中图分类号: U674.3

文献标志码: B

文章编号: 2095-7874(2024)10-0091-06

doi: 10.7640/zggwjs202410016

Key technology of layered backfilling by "self-priming and self-unloading" ship advance and retreat method on deep soft soil layers

WANG Jun-wei¹, WANG Yuan-feng², ZHANG Zhuang-zhuang², LI Cheng-zhu^{2*}

(1. CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510290, China; 2. CCCC Guangzhou Water Transport Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510290, China)

Abstract: In order to solve the problems of high water content, low strength and large average thickness of the soft soil layer in the backfilling operation area in the reclamation development project (Phase I) of the SM Group in Pasai City, Philippines, when direct reclamation is carried out, the foundation is prone to silt squeezing and local instability, which affects the quality of subsequent construction, the key technology of layered backfilling by the "self-priming and self-unloading" ship advance and retreat method on deep soft soil layer is proposed, and the technology is optimized from the aspects of advance and retreat construction, volume measurement, construction fleet scheduling, etc. The key technology of layered backfilling by the "self-priming and self-unloading" ship advance and retreat method under the backfilling on deep soft soil layers has high construction efficiency, effectively solving the quality control problem of backfilling construction on deep soft soil layers, and can provide reference and inspiration for large-scale reclamation projects under deep water conditions.

Key words: construction efficiency; soft soil layer; layered backfilling

0 引言

随着经济发展中面临着陆地资源的紧张以及开发利用海上资源的需要, 填海造地工程越来越得到广泛的重视。如在香港人工岛 BCF 项目采用了“浚海 6”耙吸船进行艏吹填沙作业^[1], 在马尔代

夫机场岛工程选用绞吸船进行开敞式无围堰吹填施工^[2]。随着填海造地工程的逐渐增多, 所用设备也得到了很大的发展。目前疏浚设备按原理可分为两大类: 机械式挖泥船和水力式挖泥船, 其中机械式挖泥船包括抓斗式、链斗式、铲斗式等,

收稿日期: 2023-10-20 修回日期: 2024-08-28

作者简介: 王军伟 (1982—), 男, 河南周口人, 高级工程师, 从事港口与航道工程、海洋工程、测绘工程以及技术管理等工作。

* 通讯作者: 李承柱, E-mail: 303661244@qq.com

水力式挖泥船主要有绞吸式、耙吸式、斗轮式等,水力式挖泥船由于具有依靠水力输送或船舶自航可以长距离输送挖掘介质的优点,适宜疏浚大型化的发展趋势^[3]。近年来,一种同时具备采砂、运砂、卸砂的皮带砂船(以下简称“三合一”船)在填海项目中得到广泛应用。“三合一”船兼具采砂、运砂及卸砂的功能,相对于抽砂船和运输船分离的情况,减少1套动力装置及其他相关设备设施,总体上能耗较少,过驳时间显著缩减,船舶灵活性大、周转快捷、避风方便,适用于围海造地、码头等工期紧、任务重的工程项目。由于“三合一”船具备上述独特的优势越来越受市场欢迎^[4-5]。

目前“三合一”船在国内主要应用于浅水条件下的小型填海项目中,且一般为中小型的“三合一”船参与回填施工,少有在深水条件下的大型填海项目中大批量使用大型“三合一”船进行回填施工的经验。在吹填施工方面,主要有直接吹填法和分层吹填法2种,分层吹填法具有利用土料自身的排水通道,增大横向排水效应,防止挤淤和边坡失稳,缩短后期地基处理的时间等优势^[6-8]。针对不具备侧推功能的“三合一”船可采用进退法进行施工。目前国内尚未有“三合一”船在深厚软土层上进行进退法分层回填施工的应用。

本文介绍了在菲律宾帕赛市-SM集团吹填开发项目(I期)中采用“三合一”船进行分层回填关键工艺的实施情况。由于菲律宾帕赛市-SM集团吹填开发项目回填施工存在工程量大、回填区域存在较厚的软土层、工期紧等问题,为了保证项目施工质量要求,采用“三合一”船进行进退法分层回填施工;同时为了保证装砂、卸砂等施工工序的紧密衔接,对“三合一”船方量测量作业提出了更高要求,采用了能满足项目进度衔接需求的BLK2G0手持式三维激光扫描作业;为了满足业主的工期要求,采取了高效协调的“三合一”船组施工调度机制对现场30多艘“三合一”船进行高效率的施工调度。

1 工程概况

菲律宾帕赛市-SM集团吹填开发项目位于菲律宾马尼拉帕赛市,地处马尼拉湾。项目主要施工内容包括回填形成A、B、C3个人工岛及相关配套的护岸结构、地基处理等,回填工程量约9 711万 m^3 ,其中采用“三合一”船进退法分层回填施工区域的水深范围为4~20 m,回填完成后,

形成陆域面积约396万 m^2 。

2 工程关键点

1) 回填区域存在较厚的软土层。根据现有的地勘资料,整个吹填区域的水深为4~20 m。在吹填区存在平均厚度超过了10 m的软土层,该软土层为淤泥或粉质黏土,标贯击数 N 普遍不超过2击,局部位置可达8击,软土层含水率高,超过100%,可压缩性强,平均重度为 14.0 kN/m^3 ,强度低,表层2 m的不排水抗剪强度 C_u 值仅为2 kPa。

国内传统的大型深海吹填工程一般采用耙吸船直抛和绞吸船吹填等直接吹填的施工方法,但在本项目深厚软基上施工会存在吹填厚度不均匀的问题,造成滑坡、泥砂混合、大范围拱淤等不利情况,增加后续地基处理难度,无法应对本工程施工区域水深较深,软土层含水率高、强度低、厚度大的情况。

2) 项目施工对方量提出更高的要求。项目采用多艘船运砂,同时作业,面临多艘“三合一”船同时抵达等待方量及全天候砂船方量测量等问题;项目回填砂量需求较大,且每 m^3 砂的单价较高,需要快速准确的测量,控制回填质量与效率;传统的人工方量方式存在很多缺点,导致在砂船方量过程中容易出现误差、速度慢等问题,无法满足现场施工需求。

3) 项目工期紧。为保证“三合一”船的高效运行,需建立合理的“三合一”船组施工调度机制。由于项目回填工程量大,且取砂区距离吹填区的运距约180 km,项目决定采用30多艘“三合一”船进行运砂及分层摊铺施工,而“三合一”船数量多且取砂效率基本一致,抵达施工区时间紧凑,一般在回填作业面上同时存在4~5艘“三合一”船同时进行回填施工,为保证项目回填施工的高效运行,需建立高效协调的船组调度机制。

3 针对性解决方案研究

3.1 进退法分层回填关键工艺

3.1.1 “三合一”船回填施工方式

“三合一”船分层回填施工流程见图1。在现场取砂作业中,“三合一”船航行至指定取砂位置后,下放船侧吸砂管至合适水深位置,调整好船位,通过喷射泵形成负压,将水下的砂吸入船舶的输砂管中。之后,砂料通过输砂管路送到船舱上方的装舱管中,在装舱过程中,需根据船舶吃水情况,实时调节装舱口位置,直至装舱结束。

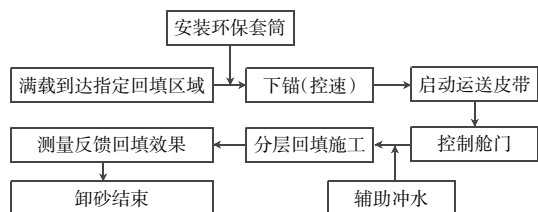


图 1 “三合一”船分层回填施工流程图

Fig. 1 Layered backfilling construction process diagram of the "self-priming and self-unloading" ship

在卸砂作业中, 当“三合一”船抵达回填区后, 在锚艇配合下, 利用 GPS 精确定位系统, 在指定

点抛下 2 个边锚, 将船舶船位调整至最优位置。卸砂时, 船舶主机处于启动状态, 便于船舶更好地实时调整位置, 保证传送带完全覆盖预先设定的卸砂区域。随后, “三合一”船沿预设的回填施工网格匀速摆动船体以调整卸砂点。开启舱底卸砂舱门后, 船舱中的砂料通过皮带输送到指定范围, 还可通过收放锚链和船舶操纵, 局部调整抛砂位置。根据填砂厚度要求, 调整皮带输送机转速及舱门开启数量, 控制卸砂效率。本次施工共分为 1~4 船次, 具体“三合一”船卸砂驻位布置如图 2 所示。

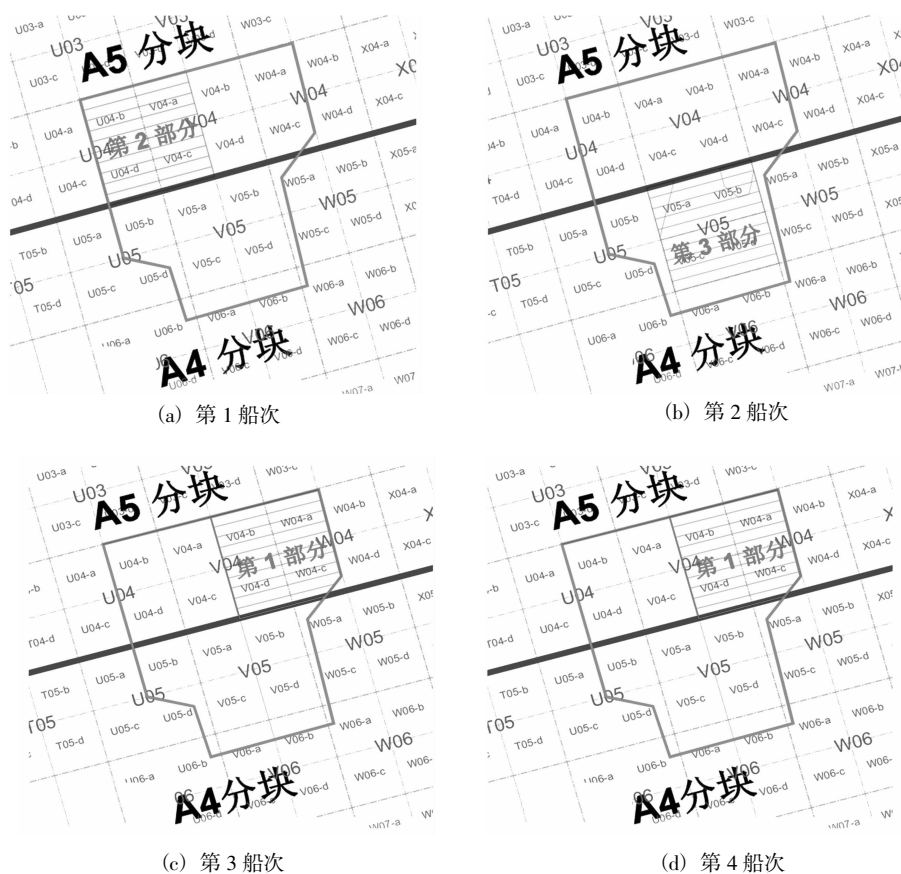


图 2 “三合一”船卸砂驻位布置图

Fig. 2 Site map of the "self-priming and self-unloading" ship sand unloading station

3.1.2 “三合一”船施工关键参数确定

施工中“三合一”船在指定的回填网格处抛锚就位, 定位完成后, 开启舱底卸砂舱门, 船舱中的砂料通过皮带输送到指定范围, 卸载过程中调整皮带输送机转速及舱门开启数量, 以控制卸砂效率。

1) 施工网格回填面积计算

$$S = V / H$$

式中: S 为回填面积, m^2 ; V 为“三合一”船装舱方量, m^3 ; H 为分层回填要求厚度, m 。

2) 计划线布设总里程 (需根据具体布线计算)

$$N = S / L$$

式中: N 为计划线布设总里程, m ; L 为卸载砂扩散宽度, m 。

3) 移动速度计算

$$M = N / Q$$

式中: M 为移动速度, kn; Q 为卸砂时长, h。

4) 卸砂时长计算

$$Q = V / F$$

$$F = W \times B \times R$$

式中: F 为卸砂机输砂效率, m^3/s ; W 为皮带宽度, m; B 为皮带运砂平均厚度, m; R 为卸砂机转速, m/s。

5) 分层回填厚度控制

$$H = W \times B \times R / (L \times M)$$

分层回填厚度 H 为 0.5~1.0 m, 皮带宽度 W 为 2.5 m, 皮带运砂平均厚度 B 为 0.16 m, 卸砂机转速 R 为 2.5 m/s, 卸载砂扩散宽度 L 为 10 m, 移船速度按 0.2~0.3 kn 控制, 根据分层回填后实际回填厚度进行优化调整。

3.1.3 进退法网格施工精度控制

对于多数不具备侧推功能和横移锚的“三合一”船, 船舶无法在小范围内进行较大幅度的方向调整, 并对于在有变化水流和变化风向的水域中进行较为精准的走抛施工具有较高驾驶要求, 因此, 为减缓船舶驾驶压力和使船舶施工时尽量减少大幅度摆动的概率, 制定进退法施工。

由于回填砂从皮带输送机落点传送到海底的过程中, 存在着扩散效应, 结合项目回填区水深条件, 划定网格尺寸宽度 10 m。此外, “三合一”船 1 次抛锚为 5~6 节锚链长度, 单次抛锚后, 通过绞锚及动车可后退的距离约为 80 m, 为提高船舶施工效率, 减少不必要的移船时间, 后退长度需按照 80 m 控制。进退法施工方法见图 3, 其中“三合一”船每次可后退 10 m, 1 次下锚可共后退 8 次。“三合一”船通过 GPS 及可视化导航软件进行精准定位后, 每回填完 1 个 10 m×10 m 网格后退 10 m, 完成第 1 个 10 m×80 m 后, 移船至相邻的第 2 个 10 m×80 m 网格进行下一组回填作业。

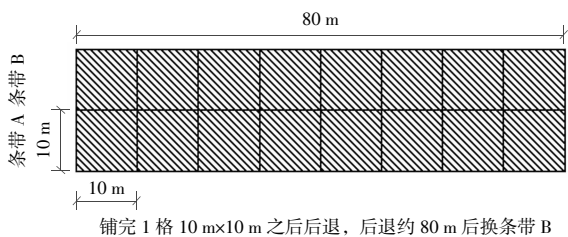


图 3 进退法施工示意图

Fig. 3 Advance and retreat method construction schematic diagram

抛砂过程中, 通过控制输送皮带的转速和皮

带摆动的时间以达到控制回填砂厚度和均匀性要求; 加强水深测量频次, 监控回填质量, 每层分层回填完成后, 对施工区块进行水深测量, 并对漏抛区域进行补抛。

3.2 “三合一”船方量测量作业

由于项目工期紧任务重, 皮尺测舱测量在时间和精度方面难以满足项目需求, 背包式激光扫描测量可快速采集, 但是在面对“三合一”船方量测量时考虑到船舱底部与甲板面高差可达十多米, 测量人员需要携带体积较大的背包式三维激光扫描仪爬绳梯, 既不方便携带易造成人员及仪器跌落的隐蔽性危险, 且成本造价高。针对上述问题, 项目决定采用 BLK2G0 手持式三维激光扫描作业。

在进行实际测量作业时, 由于“三合一”船数量较多且每艘“三合一”船的舱部结构存在差异。根据每艘“三合一”船的结构对行走路线进行规划, 保证 BLK2G0 手持式三维激光扫描作业仪器有效测程的重叠率。为保证测量数据的精度, 一般先沿着船舶右舷行走, 然后从左舷返回, 再沿中间行走 1 个来回, 可满足本项目所有“三合一”船的点云数据覆盖范围及数据重叠, 测量路径规划见图 4。经过现场实际测量, 发现该作业方式具备以下优点:



图 4 测量路径规划示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measurement path planning

1) 徕卡 BLK2G0 三维激光扫描仪将激光 SLAM 与视觉 SLAM 融合, 推出新型定位技术——GrandSLAM 双重定位技术。相比于传统的 SLAM 定位技术, GrandSLAM 解决了手持移动扫描产品精度低的难题, 极大地提高了定位的准确性, 保

证了数据的精度, 设备相对精度能达到厘米级。

2) 作业效率高。徕卡 BLK2G0 三维激光扫描仪体积小, 仪器重量只有 650 g, 方便携带; 1 人 1 h 可完成 5 艘“三合一”船方量测量; 不受 GPS 信号影响, 可进行全覆盖精准测量作业。

通过在施工测量过程中采用不同天数方法对测量时间测试结果进行比对分析, 数据表明: BLK2G0 手持式三维激光扫描作业测量数据高程精度达到了 2 cm 以内, 测量“三合一”船方量每船次外业测量时间达到了 10 min 以内, 大大提升了“三合一”船砂量测量的精度和效率, 能够充分满足工程的需求。

3.3 “三合一”船组施工调度机制

在回填施工作业时, 为保证“三合一”船都得到高效的利用, 依据“三合一”船航速、回填区与采砂区之间的距离以及船舶施工作业时间, 可以将 30 多艘“三合一”船编为 6 组, “三合一”船组循环机制见图 5。回填作业面一般只有 4~5 艘“三合一”船同时进行回填施工, 为减少各施工船舶间的干扰, 同时保证工作面的连续性, “三合一”船间的错间距控制在 200 m 左右。在“三合一”船施工中根据各施工网格分层工程量、“三合一”船规格尺寸等对施工区网格提前进行规划布置, 制作“三合一”船施工控制台账, 提前将规划的每船次卸砂位置发送至船舶控制室, 每船次卸砂时间约为 150 min。在对卸砂位置、抛填均匀度等的实时监

测中, 当个别船舶出现故障未能及时抛填时, 根据实际情况调整其它船舶的施工计划, 每天对抛填区域回填施工情况进行汇总统计, 及时调整“三合一”船施工计划。

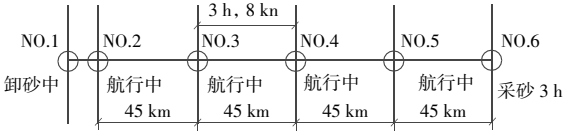


图 5 “三合一”船组循环示意图
Fig. 5 Schematic diagram of "self-priming and self-unloading" ship group cycle

4 施工效果分析

在“三合一”船采用进退法分层回填施工后, 选取 4 次典型船次施工对供砂方量、回填有效方量、回填覆盖面积、不同回填厚度的面积占比、回填时间、回填效率等施工效果有关参数进行分析。回填质量统计见表 1, 在对回填厚度的统计分析中发现, 在 4 次船次施工中, 回填厚度在 0.5~1 m 之间的回填面积占比较大, 均能覆盖回填面积的 60%以上, 同时回填厚度在 1 m 以上的回填面积仅占总回填面积的 7%~12%。部分区域回填过厚可能是由于施工中采用拖锚施工的方式辅助船舶稳定, 随着水深不确定的变化, 锚抓力有时会增大, 导致船速易变为 0。总的来说, “三合一”船的回填施工厚度基本上能控制在 1 m 以内, 可以满足施工技术要求。

表 1 回填质量统计表
Table 1 Statistical table of backfill quality

回填船次	供砂方量/m ³	回填有效方量/m ³	回填覆盖面积/m ²	实测回填面积/m ²			不同范围内平均回填厚度/m				回填厚度面积占比/%		
				0.2≤H<0.5	0.5≤H≤1.0	H>1.0	0.2≤H<0.5	0.5≤H≤1.0	H>1.0	总体平均	0.2≤H<0.5	0.5≤H≤1.0	H>1.0
第 1 船次	12 341	11 001	14 656	3 327	9 834	1 495	0.34	0.80	1.34	0.75	22.70	67.10	10.20
第 2 船次	12 244	11 399	15 582	3 458	10 172	1 952	0.32	0.77	1.26	0.73	22.19	65.28	12.53
第 3 船次	12 283	10 800	16 210	4 570	9 977	1 663	0.34	0.75	1.06	0.67	28.19	61.55	10.26
第 4 船次	12 047	10 619	14 900	3 798	9 976	1 126	0.33	0.80	1.23	0.71	25.49	66.95	7.56

选取现场施工“宏海 189”“三合一”船作为代表船型分析。“宏海 189”主要参数见表 2, 布置图见图 6, 其中“宏海 189”“三合一”船的空舱舱容为 13 275 m³。“宏海 189”1~4 船次回填工效见表 3, 分析可知在 4 船次施工中, 单船次的最大装舱方量为 12 341 m³, 最小装舱方量为 12 047.30 m³, 平均装舱率为 92.12%, 由此可知在实际施工中“三合一”船的舱容得到了较为有效的利用。表 3 中的

表 2 “宏海 189”主要参数表
Table 2 The main parameter table of "Honghai 189"

项目	参数	项目	参数
船长/m	134.8	空载吃水/m	约 4.2
型宽/m	24.8	满载吃水/m	约 7.9
型深/m	9.6	空载航速/kn	约 7.8
主机功率/kW	4 412	满载航速/kn	约 5.8
最大舱容/m ³	13 275	离心泵数量	双离心泵
吸取砂管长度/m	70	皮带机功率/kW	2×2 206

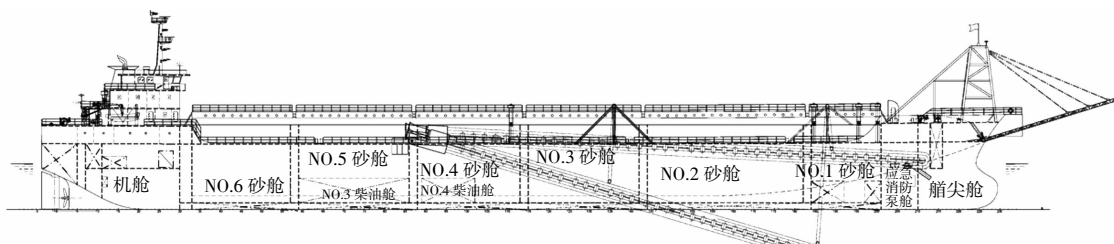


图6 “宏海189”布置图

Fig. 6 "Honghai 189" layout drawing

表3 回填工效分析表

Table 3 Analysis of backfill efficiency

回填船次	净回填时间/h	供砂方量(装舱方量)/m ³	回填有效方量/m ³	平均回填厚度/m	回填效率/(m ³ ·h ⁻¹)	(回填有效方量/供砂方量)/%
第1船次	3.60	12 341.00	11 000.92	0.75	3 428.06	89.14
第2船次	3.00	12 243.60	11 398.89	0.73	4 081.20	93.10
第3船次	2.80	12 282.70	10 799.69	0.67	4 386.68	87.93
第4船次	2.50	12 047.30	10 619.37	0.71	4 818.92	88.15
平均	2.98	12 228.65	10 954.72	0.72	4 178.71	89.58

单船次回填最长净回填时间 3.6 h, 最小净回填时间 2.5 h, 平均净回填时间 2.98 h; 对应的回填效率除第 1 次为 3 428.06 m³/h, 其余 3 船次的施工回填效率均大于 4 000 m³/h, 平均回填效率为 4 178.71 m³/h, 回填的平均效率达到 89%以上。

5 结语

在深厚软土层上的“三合一”船采用进退法进行分层回填施工、BLK2G0 手持式三维激光扫描作业、建立“三合一”船组施工调度机制等关键施工工艺, 可以达到精准均匀铺砂的效果, 充分发挥了“三合一”船的设计性能, 有着较高的施工效率。本工程所采用的“三合一”船进退法分层回填关键工艺可为国内外类似的大厚度软基础上的回填施工提供技术经验借鉴。此外, “三合一”船还可以与耙吸船、绞吸船这类大型疏浚船舶进行配合施工, 在实际使用中具有灵活性高、适用性广的特点。本工程中的施工经验, 可为更多不同种施工船舶组合回填施工项目提供技术参考借鉴。

参考文献:

- [1] 黎汉庭. 浚海 6 香港人工岛船吹填沙操作方案[J]. 珠江水运, 2020(12): 53-55.
LI Han-ting. Operation scheme of dredging and reclaiming sand at the bow of Junhai 6 on Hongkong artificial island[J]. Pearl River Water Transport, 2020(12): 53-55.
- [2] 窦硕, 杜峰, 张晋勋, 等. 开放式无围堰珊瑚岛礁吹填施工技术[J]. 施工技术, 2019, 48(4): 32-35.
DOU Shuo, DU Feng, ZHANG Jin-xun, et al. Study on coral sand dredged filling construction with non-cofferdam reclamation

- method[J]. Construction Technology, 2019, 48(4): 32-35.
- [3] 倪福生. 国内外疏浚设备发展综述[J]. 河海大学常州分校学报, 2004(1): 1-9.
NI Fu-sheng. Development of international dredging equipment[J]. Journal of Hohai University Changzhou, 2004(1): 1-9.
- [4] 陈茂仙. 沿海自吸自卸砂船主尺度参数及线型设计特点分析[J]. 福建交通科技, 2021(7): 83-85.
CHEN Mao-xian. Analysis of main dimensional parameters and linear design characteristics of coastal self-priming and self-unloading ship[J]. Fujian Traffic Science and Technology, 2021(7): 83-85.
- [5] 翟玉刚, 魏汉辉, 刘东海, 等. 抽砂泵船和皮带抽砂船组合施工工艺的应用探讨[J]. 产业创新研究, 2018(7): 112-113.
ZHAI Yu-gang, WEI Han-hui, LIU Dong-hai, et al. Exploration of the application of the combination construction technology of sand pumping boat and belt sand pumping boat[J]. Industrial Innovation, 2018(7): 112-113.
- [6] 刘志强, 王新强, 卢景润. 分层吹填法在填海工程中的应用[J]. 港工技术, 2012, 49(2): 62-64.
LIU Zhi-qiang, WANG Xin-qiang, LU Jing-run. Application of dredger-fill in-layers in sea reclamation project[J]. Port Engineering Technology, 2012, 49(2): 62-64.
- [7] 王天江, 张红灵. 砂垫层在软土地基处理中的应用[J]. 科技信息(科学教研), 2007(14): 301.
WANG Tian-jiang, ZHANG Hong-ling. Application of sand cushion layer in soft soil foundation treatment[J]. Science & Technology Information, 2007(14): 301.
- [8] 杨显庆. 分层区块化吹填在超厚淤泥底质吹填区的应用[J]. 水运工程, 2018(S1): 62-65, 69.
YANG Xian-qing. Application of stratified block fill in ultra-thick silt bottoming fill area[J]. Port & Waterway Engineering, 2018(S1): 62-65, 69.